

一种基于开口谐振环的高增益宽带双极化天线设计

任宇辉^{①②} 丁君^{*①} 郭陈江^①

^①(西北工业大学电子信息学院 西安 710129)

^②(西北大学信息科学与技术学院 西安 710069)

摘要: 该文设计并制作了一种基于超材料的高增益宽带双极化天线,该天线由两个正交放置的印刷振子单元、馈电巴伦及金属接地板构成。为了进一步展宽带宽、提高增益,在天线上加载了开口谐振环、互补开口谐振环等超材料结构。测试结果表明,该天线回波损耗小于-10 dB的带宽约为69%(0.98~2.01 GHz),在相同的频带内隔离度大于20 dB。由于开口谐振环的引向作用,天线的辐射特性得到改善,增益最大提高了4.1 dB左右。和已有设计相比,该天线的总体高度减小了约12%。其可以当作独立天线使用,也可用作反射面天线的双极化馈源。

关键词: 开口谐振环;互补开口谐振环;双极化天线

中图分类号: TN823

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)11-2790-05

DOI: 10.11999/JEIT170111

Design of a High-gain Wideband Dual-polarized Antenna Based on Split Ring Resonators

REN Yuhui^{①②} DING Jun^① GUO Chenjiang^①

^①(School of Electronics and Information, University of Northwestern Polytechnical, Xi'an 710129, China)

^②(School of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: A wideband and high gain dual-polarized antenna based on split ring resonators is presented. The antenna is composed of two cross printed dipole antennas vertically fixed on an aluminum plate as ground plane, which are excited by two similar micro-strip baluns. In order to further improve the gain with a broad bandwidth, split ring resonators and complementary split ring resonators are loaded on the printed dipole antennas. Measured results show that the proposed antenna achieves -10 dB return loss with bandwidth of 0.98~2.01 GHz (69%), and its port isolation is higher than 20 dB within that band. The maximum gain of antenna is improved up by 4.1 dB because of split ring resonators. Furthermore, the height of the antenna is reduced about 12% than the LPPDs-DPA.

Key words: Split ring resonators; Complementary split ring resonators; Dual-polarized antenna

1 引言

由于双极化天线(Dual-Polarized Antennas, DPAs)可以形成一对极化方式正交,且工作频率相同的电磁波,目前已广泛应用于电子信息领域。比如移动通信系统中,双极化天线有利于频率复用,能够实现收发同工、极化分集以及极化捷变,同时也能抵抗多径衰落^[1]。卫星通信中,双圆极化天线可以提高信道利用率和系统灵敏度^[2]。而在无线传感器网络、射频识别等物联网系统中,由于运动节点或标签天线的极化不稳定性,则要求基站或读写器天

线也要具有双极化的性质^[3]。

设计双极化天线,一般要求其具有宽带、高增益、高隔离度及低交叉极化等特性。由于微带天线具有体积小,重量轻等优点,所以早期的双极化天线多采用此类形式,但是它固有的特性决定了其宽带不理想^[4,5]。文献[6]中采用四脊喇叭天线的形式,设计了双极化、宽频带的天线,但喇叭天线笨重的结构并不适用于个人通信系统。近几年来,低剖面的印刷天线常被用来组成双极化天线,比如印刷偶极子天线、印刷对数周期天线等^[7-9]。此外,开口谐振环(Split Ring Resonators, SRRs)、互补开口谐振环(Complementary Split Ring Resonators, CSRRs)等超材料结构也被大量用于设计各类天线和微波器件,以实现其宽带化、小型化及高增益等特性^[10-14]。

自2014年起,我们团队对双极化印刷振子天线

收稿日期:2017-02-10; 改回日期:2017-08-17; 网络出版:2017-09-13

*通信作者: 丁君 dingjun@nwpu.edu.cn

基金项目: 西安爱生创新发展基金(ASN-IF2015-0901)

Foundation Item: The Innovation Development Fund of Xi'an Aisheng Group (ASN-IF2015-0901)

的设计做了一些创新。文献[9]中,通过在印刷振子馈线上加载缺陷地结构,使天线回波损耗小于 -10 dB的带宽达到45%。文献[10]中,将缺陷地结构用CSRRs代替,设计了一种工作于L波段的宽带双线极化天线(CSRRs-DPA)。该天线在大约1倍频程的带宽内回波损耗小于 -10 dB,隔离度大于25 dB。但测试结果表明其波束太宽,增益较小,且增益随频率的升高而减小。所以在文献[11]中,创新性地CSRRs-DPA前端加载对数周期无源引向器(Log-periodic Parasitic Directors, LPPDs),设计了宽带高增益双线极化天线(LPPDs-DPA)。实验结果表明,天线的最大增益提高了3.6 dB,其回波损耗小于 -10 dB的带宽约为71%。但是该设计中,各引向器的间距按照对数周期规律分布,且逐渐增大。这使得天线的高度较大,不利于其应用。

本文用SRRs阵列代替LPPDs结构,设计了新型宽带高增益双线极化天线(SRRs-DPA)。实验结果表明,该天线在0.98~2.01 GHz的带宽内回波损耗小于 -10 dB(约为69%),而且在相同的频带内天线隔离度大于20 dB。由于SRRs的引向作用,天线的增益比CSRRs-DPA最大提高了4.1 dB。而和LPPDs-DPA相比,SRRs-DPA的增益提高了0.5 dB,天线的总体高度约由165 mm减小到146 mm。

2 天线设计

2.1 SRRs-DPA 的基本结构

如前所述,文献[10]中设计了加载CSRRs的宽带、双极化天线—CSRRs-DPA,其由两个正交放置的印刷偶极子单元组成。仿真结果表明,印刷振子天线本身就具有双谐振特性,但两个谐振点相离较远,所以不具有宽带特性。而CSRRs单元的加载,拉近了两个谐振点的距离,获得了较大的带宽。测试结果显示,CSRRs-DPA回波损耗小于 -10 dB的带宽为1.02~2.03 GHz,相对带宽达到1倍频程。而且在相同的频率范围内,天线隔离度大于25 dB。

CSRRs-DPA可以用于无线传感器网络、射频识别等物联网系统中,也可以作为反射面天线的双极

化馈源,用于雷达、卫星通信等系统中。但测试结果显示,该天线的波束宽度随着频率的升高而增大。尤其是H面波束,在高频段的最大辐射方向产生了分裂。因此,CSRRs-DPA作馈源时,其 -10 dB波束宽度将不满足反射面天线照射角的要求。本文中设计的SRRs-DPA,即利用SRRs阵列的特殊谐振作用,将其加载于CSRRs-DPA的前端,从而在天线辐射方向形成特殊结构引向器,显著地提高了天线的增益,并减小了波束宽度。

天线整体结构如图1(a)所示,其基本形式仍然是两个交叉放置的、加载CSRRs的印刷偶极子天线。图1(b)表示天线单元背面的巴伦结构,图1(c)则为其正面视图。设计中沿 y 轴方向放置4行SRRs单元,每一行的大小均不相同,其内、外环边长分别为 a_i 和 b_i ($i=1,2,3,4$)。第1行SRRs单元和辐射振子的间距为 d_1 ,4行SRRs之间的间距均为 d_2 。在 x 轴方向,每一行均有10个相同的单元,且都为等间距分布(d_3)。本设计中,印刷振子单元、CSRRs和巴伦的设计方法及参数均和文献中[10]相同。SRRs通过CST软件参数优化功能来设计。介质板为 $\epsilon_r=2.65$, $h=2$ mm, $\tan\delta=0.001$ 的聚四氟乙烯玻璃布板,印刷振子和馈线部分均采用厚度 $t=0.036$ mm的铜箔,接地板是 150×150 mm²的金属铝板。

2.2 SRRs 对天线性能的影响及其工作机理分析

首先,分析SRRs结构对天线特性的影响。如图2(a)所示,随着SRRs尺寸的变大,天线回波损耗整体趋势变化不大,只是在高频段有些波动。但是由图2(b)可知,SRRs尺寸对天线增益变化趋势有较大影响:随着SRRs尺寸的增大,增益最大值向低频偏移,且其随频率增大的趋势越来越明显。本设计中,综合统筹天线的阻抗带宽、增益和整体高度,最终选定4排SRRs的大小渐变分布,通过仿真优化得到SRRs最佳尺寸如表1所示。将天线最佳回波损耗和增益的仿真曲线与CSRRs-DPA做比较,结果如图3所示。其中图3(a)中曲线A即为

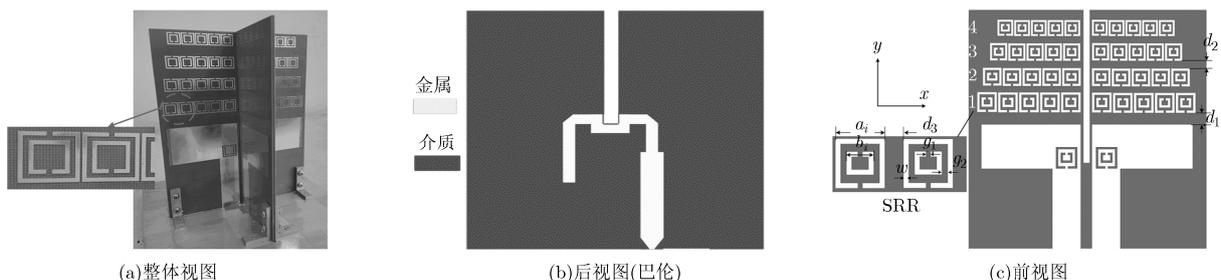


图 1 SRRs-DPA 基本结构

表1 SRRs-DPA 主要参数

参数	a_1	a_2	a_3	a_4	b_1	b_2	b_3
数值(mm)	10.0	9.5	9.0	8.5	6.8	6.3	5.8
参数	b_4	d_1	d_2	d_3	w	g_1	g_2
数值(mm)	5.3	10.0	8.0	0.3	0.8	0.8	0.8

CSRRs-DPA 的回波损耗特性曲线, B 和 C 为本设计中加载 SRRs 后两个端口处回波损耗。显然, 由于 SRRs 的引入, 使得天线阻抗匹配更好, 回波损耗在 1.1 ~ 2.1 GHz 范围内均小于 -10 dB, 相对带宽为 62.5%。图 3(b)中, 没有加载 SRRs 时, 在 1~2.1 GHz 的范围内, CSRRs-DPA 的增益随频率的升高而减小, 且最大增益为 7.1 dB; 但在加载了 SRRs 后, SRRs-DPA 增益显著提高。在同样的

频带内, 其最小增益为 7.3 dB, 最大为 10.6 dB, 且总体变化趋势随着频率的升高而增大。

其次, 为了深入理解 SRRs 特殊的谐振和引向机理, 文中仿真分析了 4 排 SRRs 阵列的传输特性^[15]。如图 4(a)所示, 在 CST 软件中建立模型。参照图 1(c)中的坐标关系, 将设计的 4 排 SRRs 阵列置于 TEM 波导中。沿 x 轴方向的波导壁设为电壁(PEC), 沿 z 轴方向则设为磁壁(PMC), 电磁波沿 y 轴方向传播。此时, 电场的方向与 SRRs 的开口边平行, 磁场垂直穿过阵面。

如果SRRs尺寸是渐变的, 其 S 参数如图4(b)所示。在0.74 ~ 2.02 GHz的频带内 $|S_{11}| \leq -10$ dB, 这对应的是SRRs阵列的通带。在2.02~2.12 GHz的频带内, $|S_{11}| \leq -3.1$ dB, 回波损明显增大。当频率

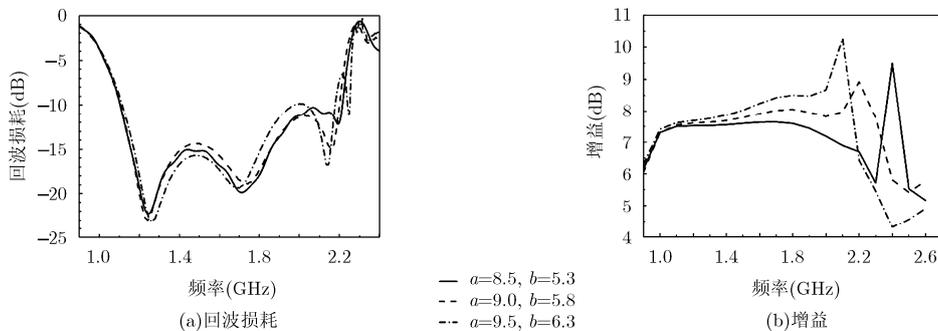


图2 SRRs 尺寸对天线特性的影响

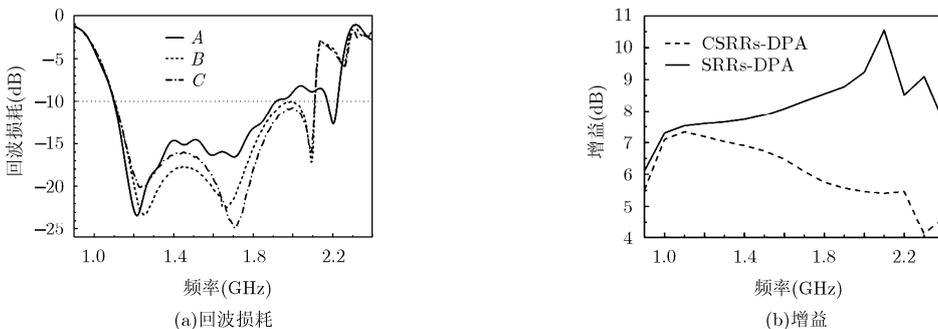
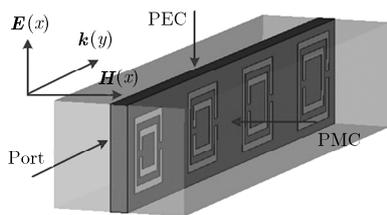


图3 SRRs-DPA 最佳特性仿真



(a) SRRs阵列置于TEM波导中

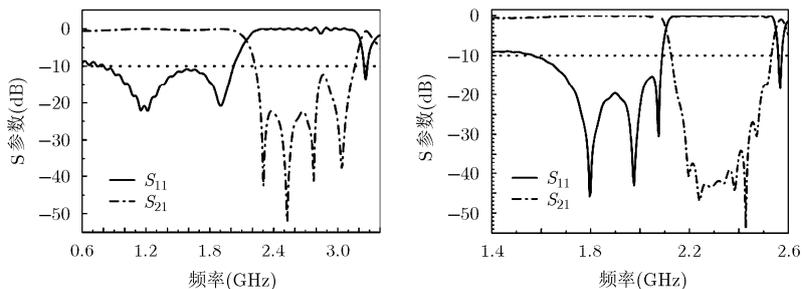


图4 SRRs 阵列特性分析

高于2.12 GHz时对应的是SRRs阵列的阻带，电磁波传输将受到抑制。参照图3(b)所示的加载SRRs阵列前后天线的增益曲线，明显可知当 $f < 2.1$ GHz，天线增益增幅显著。但当 $f > 2.1$ GHz时，对应于SRRs的阻带，所以SRRs-DPA的增益急剧下降，形成陷波频段。综上分析，由于SRRs阵列的特殊谐振特性，其可以在工作通带内当作引向器使用。

如果4排SRRs的尺寸是非渐变的，则其S参数如图4(c)所示。显然由于谐振点数目的减少，SRRs的通带和阻带范围明显减小。通带中 $|S_{11}| \leq -10$ dB的带宽仅为1.57~2.08 GHz，这显然会影响SRRs-DPA的阻抗带宽和增益带宽，所以本设计中采用了渐变尺寸的SRRs阵列。

3 天线加工测试

根据表 1 中参数加工天线实物(图 1(a))并在暗室中进行测试，该天线不包括同轴接头的最终高度为146 mm，而文献[11]中LPPDs-DPA的高度为165 mm，相比而言减小了12%。天线相关测试结果如图5~图7所示。图5为天线两个端口回波损耗的实测曲线，可以看出两个振子的反射特性基本一致。天线回波损耗小于-10 dB的带宽为0.98~2.01 GHz，相对带宽约为69%。但由于加工误差等原因，阻抗带宽整体向低频偏移了0.1 GHz左右。

隔离度是双极化天线的一项重要指标，图6所

示为天线两个端口间隔离度的仿真、测试结果。可见天线在0.87~2.02 GHz的频率范围内隔离度大于20 dB。图7为天线振子1分别在1.0 GHz, 1.6 GHz和2.0 GHz时的实测方向图。从图中可以看出，随着频率的升高，天线的波束越来越窄，且天线在最大辐射方向上的交叉极化电平平均小于-20 dB。振子2的方向图特性和振子1基本一致，此处不再赘述。

最后，将天线的方向图特性总结如表2所示。总体而言天线的增益随频率的增大而递增，波束宽度随着频率的增大而减小。和文献[10]中CSRRs-DPA的实测增益相比，天线增益的最大增幅达到4.1 dB。

4 结束语

本文在文献[10]设计的CSRRs-DPA基础上，在印刷振子前端加载了SRRs结构，从而在天线端射方向形成特殊谐振功能的引向器，明显地提高了增益。测试结果表明，SRRs-DPA天线：(1)回波损耗小于-10 dB的带宽约为69%，而CSRRs-DPA约为65.5%；(2)增益最大提高了4.1 dB，波束宽度明显减小；(3)SRRs-DPA总体高度为146 mm，和LPPDs-DPS相比减小了12%。但是和仿真结果相比，天线实测带宽向低频偏移了0.1 GHz左右，实测增益最大值也比仿真小1.5 dB。这些都需要在后续的研究中改进。

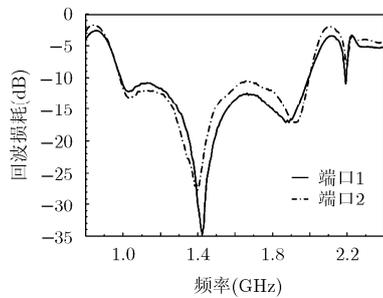


图5 天线的实测回波损耗

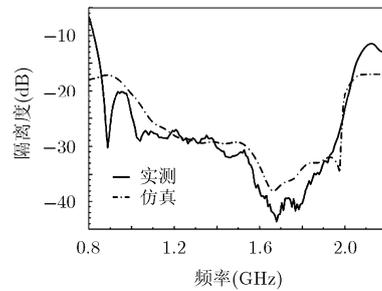


图6 天线的仿真和实测隔离度

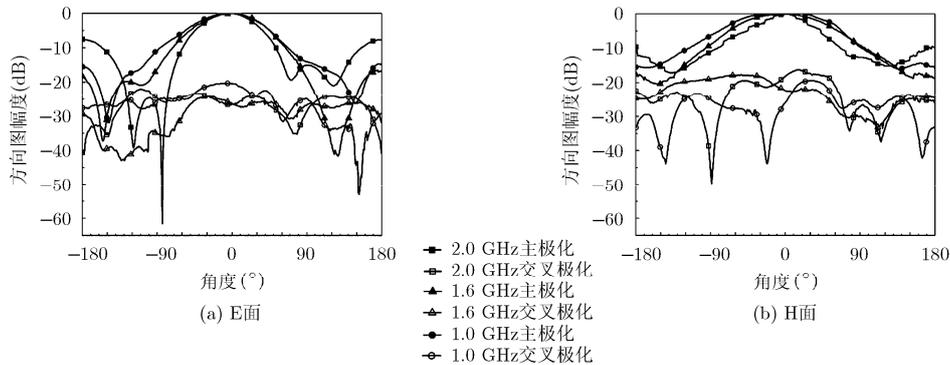


图7 天线实测方向图

表2 天线方向图特性小结

频率(GHz)		1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	
增益(dB)	振子1	6.4	6.7	7.4	7.6	8.3	8.5	
	振子2	6.2	6.8	7.3	7.6	8.1	8.4	
-10 dB波束宽度(°)	振子1	E面	159.2	152.3	150.2	148.4	137.6	112.5
		H面	173.9	162.3	149.7	132.1	127.5	113.8
	振子2	E面	160.7	152.5	149.5	143.7	132.4	119.5
		H面	173.5	160.2	150.6	131.3	126.2	112.6
隔离度(dB)		24.6	27.3	30.3	37.9	40.4	23.3	

参考文献

- [1] CUI Guanfeng, ZHOU Shigang, ZHAO Gang, *et al.* A compact dual-polarized antenna for base station application [J]. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2016, 59: 7-13. doi: 10.2528/PIERL16010804.
- [2] LI Z, CHEN L, ZHANG H, *et al.* Dual-polarized patch antenna with high isolation for DTV applications[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2013, 27(14): 1759-1766. doi: 10.1080/09205071.2013.823359.
- [3] SIMONE Z, GERARD Zamora, PAU A, *et al.* Analysis of the split ring resonator (SRR) Antenna applied to passive UHF-RFID tag design[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64(3): 856-864. doi: 10.1109/TAP.2015.2513084.
- [4] GAO, Shichang, LI Lewei, LEONG M, *et al.* Dual-polarized slot-coupled planar antenna with wide bandwidth[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2003, 51(3): 441-448. doi: 10.1109/TAP.2003.809842.
- [5] 薛飞, 王宏建, 董兴超. 新型单层双频双极化微带反射阵天线的设计[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(3): 697-702. doi: 10.11999/JEIT160332.
- XUE Fei, WANG Hongjian, and DONG Xingchao. Design of a novel single layer dual-band dual-polarization microstrip reflectarray antenna[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(3): 697-702. doi: 10.11999/JEIT160332.
- [6] 高喜, 思敏, 刘扬清, 等. 宽带双极化四脊喇叭馈源研究[J]. *电波科学学报*, 2013, 28(2): 337-340.
- GAO Xi, LI Simin, LIU Yangqing, *et al.* Broadband and dual-polarized horn feed source[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2013, 28(2): 337-340.
- [7] ZHAI Guohua, CHENG Yong, YIN Qiuyan, *et al.* Gain enhancement of printed log-periodic dipole array antenna using director cell[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(8): 5915-5919. doi: 10.1109/TAP.2014.2355851.
- [8] ZHAI Guohua, HONG Wei, WU Ke, *et al.* Wideband substrate integrated printed log-periodic dipole array antenna[J]. *IET Microwaves, Antennas Propagation*, 2010, 4(7): 899-905. doi: 10.1049/iet-map.2009.0305..
- [9] 伍捍东, 王晓娜, 任宇辉, 等. 基于缺陷地结构的宽带双极化天线设计[C]. 2013年全国天线年会, 广州, 2013: 96-199.
- WU Handong, WANG Xiaona, REN Yuhui, *et al.* New dual-polarized micro-strip dipole antenna by loading DGS[C]. 2013 National Conference on Antenna of China, Guangzhou, 2013: 196-199.
- [10] REN Yuhui, DING Jun, GUO Chenjiang, *et al.* A wideband dual-polarized printed antenna based on CSRRs[J]. *IEEE Antennas Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 410-413. doi: 10.1109/LAWP.2014.2367126.
- [11] REN Yuhui, DING Jun, GUO Chenjiang, *et al.* A wideband gain-enhanced dual-polarized printed antenna based on log-periodic parasitic directors (LPPDs)[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2016, 30(8): 1021-1031. doi: 10.1080/09205071.2016.1168751.
- [12] YOO M and LIM S. SRR-and CSRR-loaded ultra-wideband (UWB) antenna with tri-band notch capability[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2013, 27(8): 2190-2197. doi: 10.1080/09205071.2013.837013.
- [13] 张明旭, 龚书喜, 刘英. 利用接地板开槽减缩微带贴片天线的 RCS [J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(2): 498-500.
- ZHANG Mingxu, GONG Shuxi, and LIU Ying. Reducing the RCS of microstrip patch antenna by cutting slots on the ground plane[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(2): 498-500.
- [14] 刘红喜, 高军, 曹祥玉, 等. 一种基于开口谐振环的高增益端射天线设计[J]. *物理学报*, 2015, 64(23): 234101. doi: 10.7498/aps.64.234101.
- LIU Hongxi, GAO Jun, CAO Xiangyu, *et al.* A design of high-gain end-fire antenna based on split-ring resonator structures[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(23): 234101. doi: 10.7498/aps.64.234101.
- [15] MARQUES R, MEDINA F, and RAFII-EL-LDRISSI R. Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials[J]. *Physical Review B*, 2002, 65: 144440. doi: 10.1103/PhysRevB.65.144440.
- 任宇辉: 男, 1980年生, 讲师, 博士, 主要研究方向为电磁超材料在天线设计中的应用.
- 丁君: 女, 1964年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁计算、天线理论与设计、微波电路设计、电磁兼容等.
- 郭陈江: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁理论、天线理论与设计、微波电路设计、电磁兼容等.